

文章编号: 0253-2697(2016)10-1256-09 DOI: 10. 7623/syxb201610005

成岩相对低渗透储层砂岩岩石力学性质的控制

——以鄂尔多斯盆地东部上古生界天然气储层为例

程敬华 李荣西 覃小丽 李得路 赵帮胜 李佳佳 吴小力 王 宁

(长安大学地球科学与资源学院 陕西西安 710054)

摘要:砂岩岩石力学性质对储层压裂设计具有重要影响,通过岩相学观察以及岩石力学试验,研究了鄂尔多斯盆地东部上古生界低渗透储层砂岩成岩相类型、岩石力学参数以及可压裂性,分析了影响岩石力学性质的岩相学因素。研究区上古生界低渗透储层砂岩可分出 6 种成岩相:蚀变杂基充填强压实致密成岩相、石英加大硅质胶结粒间孔成岩相、碳酸盐胶结交代致密成岩相、钙质溶蚀孔成岩相、杂基溶蚀孔成岩相和岩屑溶蚀孔成岩相。不同成岩相砂岩的抗压强度、弹性模量和泊松比均有所差异,脆性矿物含量、硅质胶结物含量以及压实重结晶程度越高的成岩相,则其抗压强度越大,反之则越小;孔隙度越大的成岩相,弹性模量越小;石英等脆性矿物含量越高、压实程度越弱、孔隙度越高的成岩相,则其泊松比越小,反之则越大。脆性系数较大的石英加大硅质胶结成岩相、钙质胶结溶蚀孔成岩相和杂基溶蚀孔成岩相可压裂性好,其他几类成岩相砂岩可压裂性相对较差。

关键词:成岩相;低渗透储层;砂岩;岩石力学性质;可压裂性;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122 **文献标识码:**A

Impact of diagenetic facies on mechanical properties of sandstone rock in low-permeability reservoirs: a case study of the Upper Paleozoic gas reservoir in east Ordos Basin

Cheng Jinghua Li Rongxi Qin Xiaoli Li Delu Zhao Bangsheng Li Jiajia Wu Xiaoli Wang Ning

(School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Shaanxi Xi'an 710054, China)

Abstract: Mechanical properties of sandstone play an important role in reservoir fracturing design. Based on petrographic observations and rock mechanics tests, a study is conducted on the types of diagenetic facies and mechanical properties of low-permeability reservoir in the upper paleozoic low-permeability sandstone of East Ordos Basin and the petrographic factors which influence rock mechanical properties are also analyzed. In the study area, 6 types of diagenetic facies are detected in the low permeability sandstone reservoir, i. e., matrix filling and strong compaction altered tight facies, quartz-enlarging siliceous cementation-intergranular pore facies, carbonate cementation metasomatism tight facies, calcium dissolution pore facies, matrix dissolution pore facies and clastics dissolution pore facies. For the sandstone with diagenetic facies, a certain difference exists in the compressive strength, mass modulus and poisson ratio. The more the brittle minerals and siliceous cements contained in sandstone and the higher the degree of compaction and recrystallization is, the higher the compressive strength will be, or vice versa. The higher the sandstone porosity is, the lower the elastic modulus will be. The more brittle minerals (e. g., quartz), lower compaction degree and higher porosity will lead to a lower poisson ratio, or vice versa. The sandstone with quartz-enlarging siliceous cementation facies, calcareous cementation-dissolution pore facies and matrix dissolution pore facies has high brittleness coefficient and high fracability, and those with other facies have relatively low fracability.

Key words: diagenetic facies; low permeability reservoir; sandstone; rock mechanical properties; fracability; Ordos Basin

引用:程敬华,李荣西,覃小丽,李得路,赵帮胜,李佳佳,吴小力,王宁.成岩相对低渗透储层砂岩岩石力学性质的控制——以鄂尔多斯盆地东部上古生界天然气储层为例[J].石油学报,2016,37(10):1256-1264.

Cite: Cheng Jinghua, Li Rongxi, Qin Xiaoli, Li Delu, Zhao Bangsheng, Li Jiajia, Wu Xiaoli, Wang Ning. Impact of diagenetic facies on mechanical properties of sandstone rock in low-permeability reservoirs: a case study of the Upper Paleozoic gas reservoir in east Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(10): 1256-1264.

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 40173005)和国家自然科学基金青年科学基金项目(No. 41602128)资助。

第一作者:程敬华,男,1991年11月生,2014年获长安大学学士学位,现为长安大学硕士研究生,主要从事石油地质方面研究工作。Email: 450683992@qq.com

通信作者:李荣西,男,1966年6月生,1989年获西安地质学院学士学位,1998年获中国矿业大学(北京)博士学位,现任长安大学教授、博士生导师,主要从事石油地质、流体地质等方面的研究工作。Email: rongxi99@163.com

根据中国多年油气田勘探开发实践经验和理论研究,目前一般将储集岩空气渗透率小于50 mD的油气层称为低渗透油气层^[1]。中国低渗透储层分布范围广,在大庆、胜利、吉林、辽河、大港、中原、延长、长庆、吐哈、华北等油区均存在不同规模的低渗透油气藏,低渗透油气藏资源量占中国油气总资源量的65%,可采资源量巨大^[2,3]。低渗透储层砂体薄、岩性致密、孔隙度低、孔喉半径小,渗流阻力大,岩石沉积非均质性和成岩非均质性均较强,油气聚集和分布规律复杂^[4]。低渗透储层天然能量不充足,且产量递减快,采用自然消耗方式开发时,采收率低,开发难度大。因此,必须使用有效的技术方法来开发此类油气藏。

水力压裂技术是使低渗透储层获得工业开采价值的最有效方法之一^[5,6],在常规压裂设计中,常用岩石的弹性模量、泊松比以及抗压强度等力学参数来预测储层岩石的可压裂性和破裂压力^[7-10]。影响岩石力学参数的因素包括岩石学、流体、温度、围压以及层理等,其中岩石学特征是影响岩石力学性质的最主要因素^[11,12]。前人研究已表明,砂岩比泥岩的抗压强度和杨氏模量大,而砂岩泊松比则相对小^[13];饱油岩石的抗压强度和杨氏模量均大于饱水岩石^[14,15];温度越高,岩石的抗压强度和弹性模量越低^[16,17];围压越大,岩石抗压强度、杨氏模量和泊松比都相对越大^[17,18];平行层理方向岩石的抗压强度和杨氏模量大于垂直层理方向的岩石,而泊松比则相反^[13],这些均是从单一因素的角度来探讨影响岩石力学性质的因素。

成岩相是岩性、沉积相、成岩作用和物性的综合表现^[19-21]。目前,国内外很多专家学者将成岩相应用到了油气勘探的各个领域^[22]。徐樟等有^[23]利用成岩相研究储集岩孔隙结构和孔隙演化特征;同时利用成岩相对优质储集层评价和预测的方法已经得到了广泛应用^[24-26];成岩相也被应用到识别地层层序界面^[27,28]以及进行岩相古地理学分析^[29,30]。但是,目前对于微观成岩相与宏观岩石力学之间的关系的研究比较少。不同成岩相具有不同的岩石学、成岩作用以及物性特征^[31-37],而这些特征直接决定了岩石力学参数(包括抗压强度、泊松比和弹性模量)的大小,这对石油工程中地层破裂压力预测、保证钻井安全以及低渗透油气层有效开发等具有十分重要的作用和意义^[38-43]。

笔者在低渗透储层砂岩成岩相分析的基础上,通过针对不同成岩相的代表性砂岩的力学性质试验,从岩相学角度探讨其对低渗透储层砂岩力学性质的影响。

1 基础地质特征

1.1 储层特征

鄂尔多斯盆地东部地区上古生界最主要含气层系为二叠系山西组和下石盒子组,其主要储集砂体为三角洲平原亚相的分流河道砂体及三角洲前缘亚相的水下分流河道砂体,累计砂体厚度为5~15 m,砂岩类型以岩屑石英砂岩及岩屑砂岩为主,有少量的石英砂岩,主要孔隙类型为岩屑溶孔及粒间孔,储集层平均孔隙度为5.7%,平均渗透率为0.53 mD,为典型的低渗透岩性气藏。

1.2 储层成岩相类型及特征

根据大量岩石学和显微岩相学鉴定研究,研究区上古生界主力气层划分出6种成岩相:蚀变矿物充填强压实致密成岩相、石英加大硅质胶结粒间孔成岩相、未溶蚀钙质胶结交代致密成岩相、钙质溶蚀孔成岩相、杂基溶蚀孔成岩相和岩屑溶蚀孔成岩相。

蚀变矿物充填强压实致密成岩相的特点是杂基含量一般大于10%,杂基蚀变成伊利石、高岭石等微晶集合体,云母和塑性软岩屑等压实变形强烈[图1(a)],岩石致密,孔隙度、渗透率都很低,岩性主要为岩屑砂岩。

石英加大硅质胶结粒间孔成岩相以石英砂岩为主,硅质胶结和石英次生加大发育,石英颗粒呈紧密接触,石英碎屑含量高,杂基少,残余原始粒间孔和高岭石晶间孔发育,孔隙连通性好,物性好[图1(b)]。

未溶蚀钙质胶结交代致密成岩相中钙质胶结含量高,长石、岩屑等多发生碳酸盐化,钙质胶结未被溶蚀,原生孔隙基本全被钙质胶结充填[图1(c)],储层致密,物性较差,岩性以岩屑石英砂岩和岩屑砂岩为主。

钙质胶结溶蚀孔成岩相的特征是钙质胶结物溶蚀孔发育[图1(d)],物性好,压实作用中等,主要为点一线接触,以岩屑石英砂岩为主。

杂基溶蚀孔成岩相中,杂基含量高,充填在粒间的泥质杂基、蚀变杂基以及假杂基等发生溶蚀[图1(e)],形成杂基溶蚀孔,使得该类成岩相孔隙度高,物性好。

岩屑溶蚀孔成岩相多出现在岩屑砂岩和岩屑石英砂岩中,岩屑中的高岭石、伊利石、长石等不稳定组分容易被溶蚀[图1(f)],孔隙随着溶蚀作用逐渐变大,物性也较好。

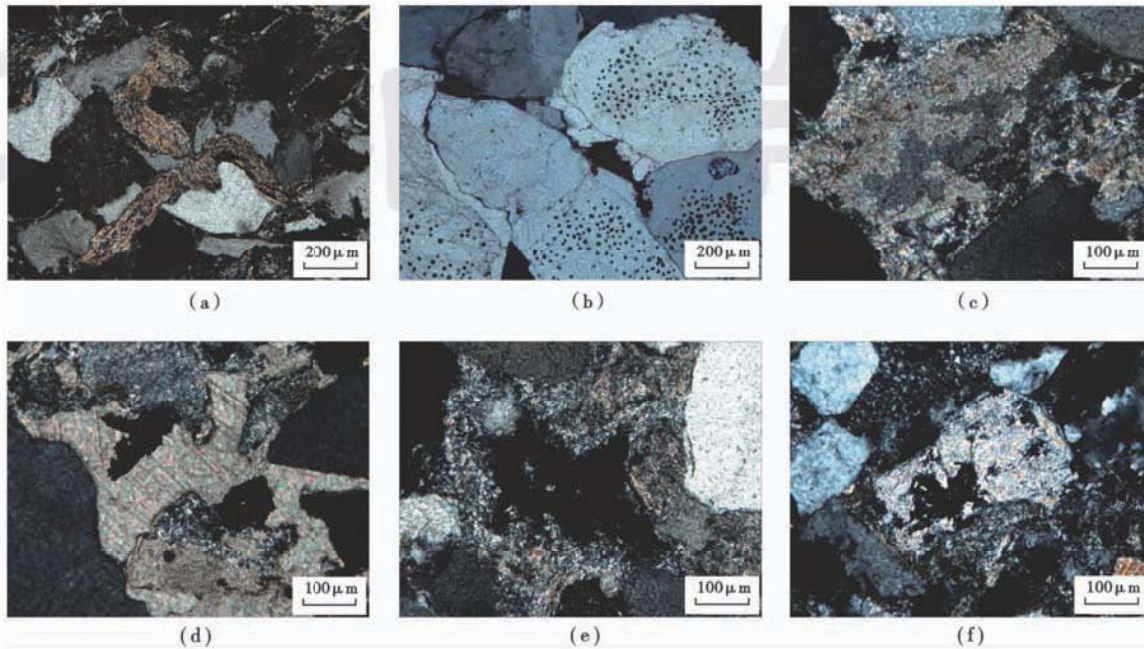
2 岩石力学实验与结果

2.1 实验方法

实验样品取自研究区钻井岩心,层位为上古生界二叠系山西组和下石盒子组。在偏光显微镜下和扫描电子显微镜下对其进行岩相学观察,划分出岩相学类

型,应用 X 射线衍射对每一类成岩相中代表性标本的主要矿物进行分析(表 1),并钻取长半径比大于 1.5 的 $\Phi 50$ mm 圆柱岩样,经饱和水处理后,再对其进行自然干燥处理(25℃, 12 h),使样品具有相同的含水状态。应用 MRT-150C 数字电液伺服实验系统测试岩石的应力—应变曲线,并分析其岩石力学参数。岩石

力学实验过程中误差主要有:①实验岩石中流体成分以及流体饱和度不同引起的结果误差。在前期样品处理时已经尽量避免此类误差,对整个测量结果的影响较小。②实验仪器的系统误差。实验中已对每一类成岩相的样品均进行了 3 次岩石力学参数的测量,最后求取平均值,使系统误差降到最小。



(a) 含泥中—细粒岩屑砂岩,压实致密结构,长石蚀变显著,可见已硅化的长石晶屑,蚀变杂基充填强压实致密成岩相,石盒子组;(b)粗粒石英砂岩,粗粒结构,石英次生加大发育,部分加大边已经出现溶蚀,石英加大硅质胶结粒间孔成岩相,山西组;(c)中粒岩屑石英砂岩,压实致密结构,方解石交代胶结现象明显,未发生溶蚀,未溶蚀钙质胶结交代致密成岩相,石盒子组;(d)中粒岩屑砂岩,压实致密结构,粒间孔多被钙质胶结物充填,胶结物多被溶蚀成港湾状,钙质溶蚀孔成岩相,山西组;(e)粗粒岩屑石英砂岩,压实致密结构,泥质杂基、蚀变杂基以及假杂基等均发生溶蚀,杂基溶蚀孔成岩相,石盒子组;(f)粗—中粒岩屑砂岩,柔性颗粒压实形变显著,长石以及岩屑内部多被溶蚀,岩屑溶蚀孔成岩相,石盒子组。

图 1 鄂尔多斯盆地上古生界储层成岩相显微照片

Fig. 1 Micrographs of different diagenetic facies of the Upper Paleozoic reservoir in Ordos Basin

表 1 实验分析结果

Table 1 The experimental results

样号	层位	岩石学特征			岩石力学特征			物性特征				
		岩性	成岩相	石英含量/%	碳酸盐岩含量/%	黏土矿物含量/%	变形类型	抗压强度/ MPa	弹性模量/ GPa	泊松比	孔隙度/ %	渗透率/ mD
D5	下石盒子组 8 段	岩屑砂岩	蚀变杂基充填强压实致密成岩相	53.0	14.0	33.0	塑—弹—塑	105.0	10.70	0.14	3.75	0.47
D11	下石盒子组 8 段	岩屑砂岩	岩屑溶蚀孔成岩相	65.6	16.8	17.6	塑—弹—塑	47.7	3.06	0.08	9.04	0.65
D25	山西组 2 段	石英砂岩	石英加大硅质胶结粒间孔成岩相	91.6	0	8.4	塑—弹	110.0	12.70	0.05	5.28	0.27
D44	山西组 2 段	岩屑砂岩	钙质溶蚀孔成岩相	84.1	1.8	14.1	塑—弹—塑	62.3	5.72	0.03	10.50	0.89
D104	下石盒子组 8 段	岩屑石英砂岩	未溶蚀钙质胶结交代致密成岩相	51.3	21.5	26.2	塑—弹—塑	43.9	8.04	0.23	3.77	0.13
D135	下石盒子组 8 段	岩屑石英砂岩	杂基溶蚀孔成岩相	78.2	1.5	20.3	塑—弹	41.1	4.73	0.05	7.54	0.27

2.2 实验结果

不同成岩相代表性岩石的应力-应变曲线分析表明研究区上古生界低渗透储层砂岩的变形类型主要为塑-弹-塑性变形和塑-弹性变形。其中蚀变矿物充填强压实致密成岩相、钙质胶结溶蚀孔成岩相和未溶蚀钙质胶结交代致密成岩相为塑-弹-塑性变形[图 2(a), 图 2(b), 图 2(c)], 岩屑溶蚀孔成岩相、石英加大硅质胶结粒间孔成岩相和杂基溶蚀孔成岩相为塑-弹性变形[图 2(d), 图 2(e), 图 2(f)]。

通过岩石力学试验获得的不同成岩相代表性砂岩的应力-应变曲线,计算出岩石的抗压强度、弹性模量

和泊松比(表 1),其中岩石完全破裂时的压力为岩石抗压强度,应力-应变曲线上轴向压应力与轴向应变之比为岩石的弹性模量,横向应变与纵向应变之比即为岩石的泊松比^[44,45]。

不同成岩相砂岩的岩石力学参数(抗压强度、弹性模量和泊松比)有明显的差距,而且其力学参数变化范围较大(图 3)。不同成岩相砂岩抗压强度变化在 41.1~110.0 MPa,其中石英加大硅质胶结粒间孔成岩相和蚀变杂基充填强压实致密成岩相抗压强度较大,两者均超过 100 MPa,岩屑溶蚀孔成岩相、钙质胶结溶蚀孔成岩相、未溶蚀钙质胶结交代致密成岩相和杂基溶蚀

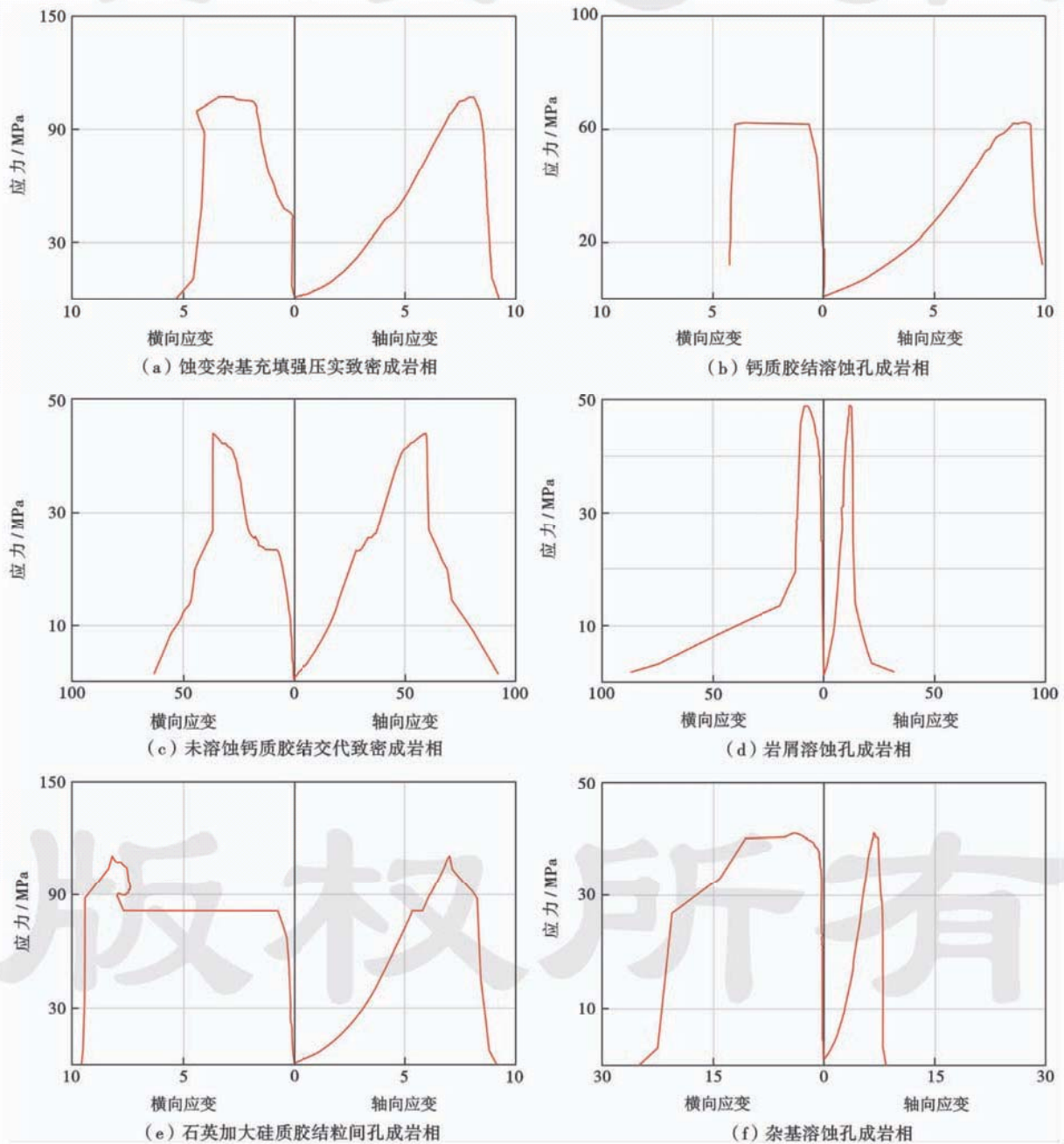
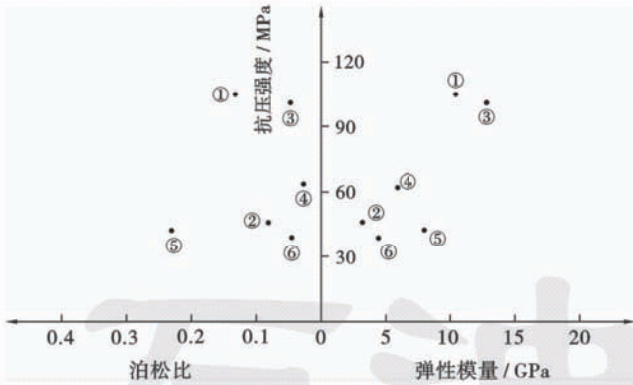


图 2 不同成岩相岩石应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of rock with different diagenetic facies



注:①蚀变杂基充填强压实致密成岩相;②岩屑溶蚀孔成岩相;③石英加大硅质胶结粒间孔成岩相;④钙质胶结溶蚀孔成岩相;⑤未溶蚀钙质胶结交代致密成岩相;⑥杂基溶蚀孔成岩相。

图 3 不同成岩相岩石力学参数

Fig. 3 Rock mechanical parameters corresponding to different diagenetic facies

孔成岩相的抗压强度明显较小。

不同成岩相岩石弹性模量介于 3.06~12.7 GPa, 石英加大硅质胶结粒间孔成岩相和蚀变杂基充填强压实致密成岩相的弹性模量均超过 10 GPa, 岩屑溶蚀孔成岩相、钙质胶结溶蚀孔成岩相和杂基溶蚀孔成岩相的弹性模量约在 5 GPa, 未溶蚀钙质胶结交代致密成岩相弹性模量介于两者之间。

不同成岩相岩石的泊松比变化在 0.03~0.23, 蚀变杂基充填强压实致密成岩相和未溶蚀钙质胶结交代致密成岩相的泊松比较大, 其他几类成岩相泊松比值明显较小。

3 讨 论

成岩相是沉积岩沉积相、岩石及矿物成分、成岩作用、孔隙结构和物性等的综合反映, 因此下面分别对岩石矿物成分、压实作用、胶结作用和孔隙度等与岩石力学之间的关系进行分析, 以讨论岩相学对低渗透储层砂岩岩石力学性质的影响。

3.1 矿物成分对力学参数的影响

对不同成岩相矿物成分与岩石力学参数关系分析研究发现, 抗压强度的大小与其石英、方解石以及黏土矿物的含量关系密切。石英含量与抗压强度呈明显的正相关关系[图 4(a)], 石英含量越高, 抗压强度越大。方解石含量与抗压强度呈明显的负相关关系, 方解石的含量越大, 岩石的抗压强度越小[图 4(a)]; 黏土矿物含量与抗压强度也呈现负相关的趋势, 黏土矿物含量越大, 抗压强度呈现变小的趋势[图 4(a)]。因此, 石英含量高的石英加大硅质胶结石英砂岩成岩相的抗

压强度明显大, 其他几类成岩相中黏土矿物和方解石含量相对较高, 因此其抗压强度相对较小。

石英、方解石和黏土矿物含量与岩石弹性模量也存在一定的相关性。随石英含量增多, 岩石弹性模量有增大的趋势[图 4(b)]。由于石英不易发生塑性变形, 当轴向压力增大时, 石英收缩应变变量较小, 因此石英含量越高弹性模量相对越大; 随方解石含量的增多, 岩石弹性模量逐渐变小[图 4(b)], 随黏土矿物含量的增多, 岩石的弹性模量也呈现一直变小的趋势[图 4(b)]。这是由于方解石与黏土矿物的塑性较强, 在受到轴向应力时, 轴向应变变量较大, 因此岩石的弹性模量随着方解石与黏土矿物含量的增多有逐渐变小的趋势。所以石英含量高的石英加大硅质胶结粒间孔成岩相的岩石弹性模量大, 而其他几类成岩相, 由于其黏土矿物和方解石含量高, 其弹性模量相对小。

石英含量与泊松比呈现明显的负相关关系[图 4(c)], 泊松比随着石英含量的增大而减小, 这与石英自身是一个刚性块体而不容易发生变形有关。当石英含量较多的岩石受到轴向应力时, 颗粒间的孔隙闭合导致轴向应变增大, 但是由于石英骨架的存在, 其横向应变基本保持不变, 因此其横向应变与轴向应变的比值小, 泊松比也小; 泊松比随着方解石含量的增大有逐渐增大的趋势[图 4(c)]; 泊松比随着黏土矿物含量的增大也有逐渐增大的趋势[图 4(c)], 显示出一定的正相关性。这主要由于方解石和黏土矿物均对轴向应力的缓冲作用较大, 其受到轴向应力时, 方解石和黏土矿物沿着垂直于其挤压的方向发生塑性变形, 导致横向变形比纵向变形大, 因此, 方解石和黏土矿物含量越多的岩石, 泊松比也越大。

3.2 压实程度对力学参数的影响

点接触为不稳定接触, 代表一种较弱的压实作用, 在力的作用下, 岩石会进一步被压实, 轴向应变变量远大于横向应变变量, 而线接触、面接触为稳定接触, 代表一种较强的压实作用, 在外力的作用下, 较难发生变形, 因此泊松比随着压实程度的增大而增大。所以, 蚀变杂基充填强压实致密成岩相和碳酸盐岩胶结交代致密成岩相着两类压实程度强成岩相的泊松比明显大, 而其他几类泊松比小。

3.3 胶结作用对力学参数的影响

一般认为, 硅质胶结物的连接性强, 钙质胶结物次之, 而泥质胶结物连接性最差^[46]。胶结物含量越多, 岩石的抗压强度越大, 越不容易发生变形^[47]。因此, 在胶结程度相同的情况下, 硅质胶结含量越高, 岩石抗压强度越大, 泥质胶结物含量越高, 岩石的抗压强度越小。明显可以看出, 硅质胶结发育的石英加大硅质胶

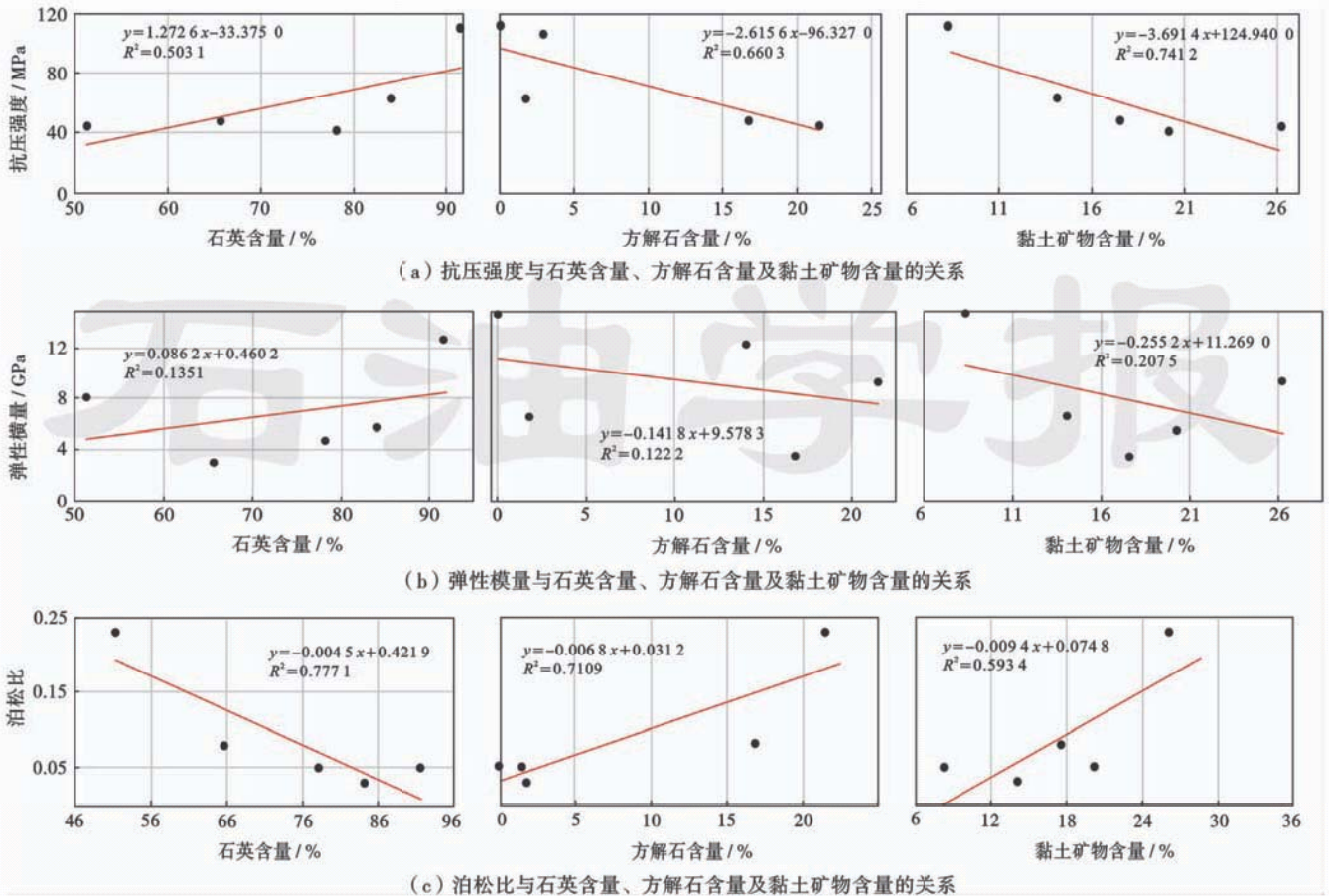


图 4 岩石力学参数与矿物含量关系

Fig. 4 Relationship between mechanical parameter and mineral content

结成岩相抗压强度大,钙质胶结物含量高的钙质胶结物溶蚀孔成岩相抗压强度次之,而主要以黏土矿物胶结的岩屑溶蚀孔成岩相和杂基溶蚀孔成岩相的抗压强度低。但是杂基含量高的蚀变杂基强压实致密成岩相的抗压强度反而高,这可能与粒间黏土矿物热液蚀变后^[48],矿物重新结晶,重新胶结有关。

3.4 孔隙度对力学参数的影响

随着孔隙度的增加,岩石的弹性模量与泊松比均有降低的趋势(图 5)。通常情况下,气体和液体比固体更容易释放应力。一般条件下的孔隙,常充填有气体和流体。在岩石受到轴向应力时,孔隙沿主压应力方向闭合,轴向应变远大于横向应变,因此孔隙度越大,泊松比越小。蚀变杂基充填强压实致密成岩相和未溶蚀钙质胶结交代致密成岩相这两类孔隙度低的成岩相弹性模量和泊松比均比较大,其他几类孔隙度相对高的成岩相,弹性模量和泊松比均比较小,只有石英加大硅质胶结致密成岩相的弹性模量反而大,这主要与硅质胶结物骨架有关。

3.5 不同成岩相可压裂性分析

岩相学因素是影响岩石可压裂性和压裂效果的主

要因素之一,高杨氏模量和低泊松比代表岩石的脆性强,反之则脆性弱,脆性强的岩石在水力压裂时更易形成复杂的裂缝网络^[49]。

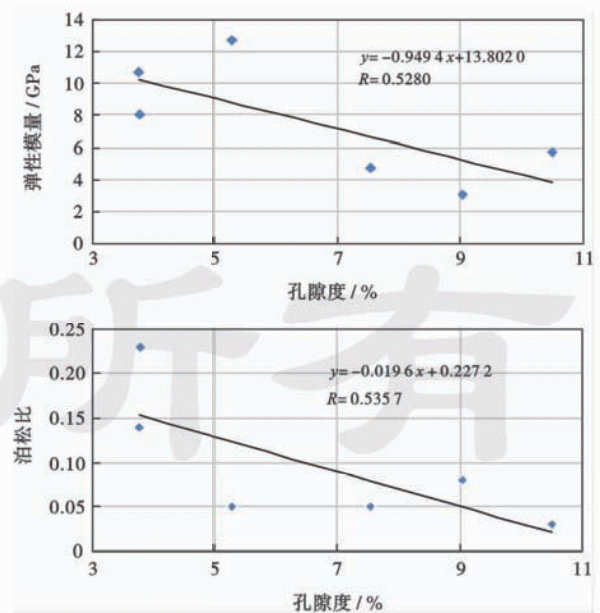


图 5 岩石力学参数与孔隙度关系

Fig. 5 Relationship between mechanical parameter and porosity

Rockman 提出用岩石的脆性系数来量化研究岩石的塑脆特征,具体方法可参考文献[50],脆性系数越高,越容易形成压裂缝,储层裂缝延伸形态也越复杂。当岩石的脆性参数小于 0.2 时,形成两翼对称的简单裂缝。当岩石的脆性参数介于 0.2~0.5 时,形成多条裂缝,裂缝局部连通。当岩石的脆性参数大于 0.5 时,基本形成网状缝,压裂效果也相对较好。

计算表明(表 2),研究区储层中石英加大硅质胶结成岩相、钙质胶结溶蚀孔成岩相和杂基溶蚀孔成岩相砂岩脆性系数较大,约在 0.7,压裂容易形成裂缝网络,可压裂性强。未溶蚀钙质胶结交代成岩相脆性系数最低,为 0.326,不易形成裂缝网络,仅能形成简单裂缝,连通性较差,可压裂性不强。蚀变杂基充填强压实致密成岩相和岩屑溶蚀成岩相的脆性系数约为 0.5,处于网缝与多缝过渡阶段,压裂可形成多缝与部分网缝,但是造缝难度相对较大,相对可压裂性中等。

表 2 不同成岩相脆性系数

Table 2 Rock fragility coefficient of different diagenetic facies

样品号	成岩相	脆性系数	压裂性特征
D5	杂基蚀变充填强压实致密成岩相	0.525	可压裂性中等,可形成多缝与部分网缝
D11	岩屑溶蚀孔成岩相	0.590	可压裂性中等,可形成多缝与部分网缝
D25	石英加大硅质胶结粒间孔成岩相	0.719	可压裂性强,容易形成裂缝网络
D44	钙质胶结溶蚀孔成岩相	0.709	可压裂性强,容易形成裂缝网络
D104	未溶蚀钙质胶结交代致密成岩相	0.326	可压裂性较差,不易形成裂缝网络,仅能形成多缝
D135	杂基溶蚀孔成岩相	0.662	可压裂性强,容易形成裂缝网络

4 结 论

(1) 研究区致密砂岩储层可划分出蚀变矿物充填强压实致密成岩相、石英加大硅质胶结粒间孔成岩相、未溶蚀钙质胶结交代致密成岩相、钙质溶蚀孔成岩相、杂基溶蚀孔成岩相和岩屑溶蚀孔成岩相 6 种成岩相。其中蚀变矿物充填强压实致密成岩相和碳酸盐岩胶结交代致密成岩相物性差,是对储层不利的成岩相,其他几类均是对储层有利的成岩相。

(2) 蚀变杂基充填强压实致密成岩相和石英加大硅质胶结粒间孔成岩相的抗压强度和弹性模量均较大,其他几类较小。蚀变杂基充填强压实致密成岩相和未溶蚀钙质胶结交代致密成岩相的泊松比大,其他类成岩相相对较小。

(3) 不同成岩相的矿物成分、压实程度、孔隙度和胶结程度等均有差异,这些差异引起岩石的抗压强度、弹性模量以及泊松比也不同。总体来讲,脆性矿物和

胶结物含量以及压实重结晶程度越高的成岩相,则其抗压强度越大,反之,抗压强度越小。矿物含量对致密砂岩的弹性模量影响相对较小,但是孔隙度对致密砂岩的弹性模量影响较大,孔隙度越大的成岩相,弹性模量越小。致密砂岩的泊松比受到矿物成分、压实程度和孔隙度多重因素的控制,脆性矿物含量越高、压实程度越弱、孔隙度越高的成岩相,则其泊松比越小,反之则越大。

(4) 不同成岩相的可压裂性不同,石英加大硅质胶结成岩相、钙质胶结溶蚀孔成岩相和杂基溶蚀孔成岩相砂岩的脆性系数较大,可压裂性强,未溶蚀钙质胶结交代成岩相脆性系数较小,可压裂性差,蚀变杂基充填强压实致密成岩相和岩屑溶蚀成岩相可压裂性中等。

参 考 文 献

- [1] 赵靖舟,吴少波,武富礼. 论低渗透储层的分类与评价标准——以鄂尔多斯盆地为例[J]. 岩性油气藏,2007,19(3):28-31.
Zhao Jingzhou, Wu Shaobo, Wu Fuli. The classification and evaluation criterion of low permeability reservoir: an example from Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2007, 19(3):28-31.
- [2] 李道品. 低渗透油田开发概论[J]. 大庆石油地质与开发,1997,16(3):33-37.
Li Daopin. Brief introduction to low permeability oilfield development[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 1997, 16(3):33-37.
- [3] 胡文瑞. 中国低渗透油气的现状与未来[J]. 中国工程科学,2009,11(8):29-37.
Hu Wenrui. The present and future of low permeability oil and gas in China[J]. Engineering Sciences, 2009, 11(8):29-37.
- [4] 李荣西,段立志,张少妮,等. 鄂尔多斯盆地低渗透油气藏形成研究现状与展望[J]. 地球科学与环境学报,2011,33(4):364-372.
Li Rongxi, Duan Lizhi, Zhang Shaoni, et al. Review on oil/gas accumulation with low permeability in Ordos Basin[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33(4):364-372.
- [5] 万玉金,韩永新,周兆华,等. 美国致密砂岩气藏地质特征与开发技术[M]. 北京:石油工业出版社,2013.
Wan Yujin, Han Yongxin, Zhou Zhaohua, et al. Tight gas reservoir geological characteristics and development of technology in American[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2013.
- [6] 谢润成. 川西坳陷中段致密砂岩气藏压裂效果评价[D]. 成都:成都理工大学,2006.
Xie Runcheng. Evaluation of fracturing effect on compact sandstone gas reservoir in middle depression of west Sichuan basin [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2006.
- [7] 吴奇,胥云,刘玉章,等. 美国页岩气体积改造技术现状及对我国的启示[J]. 石油钻采工艺,2011,33(2):1-7.
Wu Qi, Xu Yun, Liu Yuzhang, et al. The current situation of stimulated reservoir volume for shale in U. S. and its inspiration to China[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2011, 33(2):1-7.
- [8] Wang Guochang, Carr T R. Methodology of organic-rich shale lithofacies identification and prediction: a case study from Mar-

- cellus Shale in the Appalachian basin[J]. *Computers & Geosciences*, 2012, 49: 151-163.
- [9] 吴奇, 胥云, 王晓泉, 等. 非常规油气藏体积改造技术——内涵、优化设计与实现[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(3): 352-358.
Wu Qi, Xu Yun, Wang Xiaoquan, et al. Volume fracturing technology of unconventional reservoirs: connotation, design optimization and implementation[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(3): 352-358.
- [10] 薛承瑾. 页岩气压裂技术现状及发展建议[J]. *石油钻探技术*, 2011, 39(3): 24-29.
Xue Chengjin. Technical advance and development proposals of shale gas fracturing[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2011, 39(3): 24-29.
- [11] 刘新荣, 鲜学福, 余海龙. 岩性特征对岩石力学性质的影响[J]. *江西有色金属*, 2001, 15(2): 11-13.
Liu Xinrong, Xian Xuefu, Yu Hailong. The affection of lithological character to rock mechanical properties[J]. *Jiangxi Nonferrous Metals*, 2001, 15(2): 11-13.
- [12] 李庆辉, 陈勉, 金衍, 等. 页岩气储层岩石力学特性及脆性评价[J]. *石油钻探技术*, 2012, 40(4): 17-22.
Li Qinghui, Chen Mian, Jin Yan, et al. Rock mechanical properties and brittleness evaluation of shale gas reservoir[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2012, 40(4): 17-22.
- [13] 李智武, 罗玉宏, 刘树根, 等. 川东北地区地层条件下致密储层力学性质实验分析[J]. *矿物岩石*, 2005, 25(4): 52-60.
Li Zhiwu, Luo Yuhong, Liu Shugen, et al. The experimental analysis of mechanical properties of compact reservoir rocks under formation conditions, northeast of Sichuan basin, China[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2005, 25(4): 52-60.
- [14] 夏在连, 刘树根, 时华星, 等. 中伊朗盆地地层条件下裂隙性储层岩石力学性质实验分析[J]. *石油实验地质*, 2008, 30(1): 86-93.
Xia Zailian, Liu Shugen, Shi Huaxing, et al. Experimental analysis of the rock mechanical properties of the fractured reservoir under formation conditions in the central Iran basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2008, 30(1): 86-93.
- [15] 王桂花, 张建国, 程远方, 等. 含水饱和度对岩石力学参数影响的实验研究[J]. *石油钻探技术*, 2001, 29(4): 59-61.
Wang Guihua, Zhang Jianguo, Cheng Yuanfang, et al. Experimental study on the effect of the water content on the rock mechanical parameters[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2001, 29(4): 59-61.
- [16] Griggs D. Hydrolytic weakening of quartz and other silicates[J]. *Geophysical Journal International*, 1967, 14(1/4): 19-31.
- [17] 方华, 伍向阳. 温压条件下岩石破坏前后的力学性质与波速[J]. *地球物理学进展*, 1999, 14(3): 73-78.
Fang Hua, Wu Xiangyang. The mechanical properties and velocities of rocks pre- and post-failure under pressure and temperature[J]. *Progress in Geophysics*, 1999, 14(3): 73-78.
- [18] 黄荣樽, 庄锦江. 围压对岩石波松比影响的试验研究[J]. *华东石油学院学报: 自然科学版*, 1985(1): 34-46.
Huang Rongzun, Zhuang Jinjiang. An experimental study confining pressure effect on the Poisson's ratio of rocks[J]. *Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science*, 1985(1): 34-46.
- [19] 陈彦华, 刘莺. 成岩相—储集体预测的新途径[J]. *石油实验地质*, 1994, 16(3): 274-281.
Chen Yanhua, Liu Ying. Diagenetic facies—a new approach to the prediction of reservoir rocks[J]. *Experimental Petroleum Geology*, 1994, 16(3): 274-281.
- [20] 钟广法, 郭宁芬. 成岩岩相分析: 一种全新的成岩非均质性研究方法[J]. *石油勘探与开发*, 1997, 24(5): 62-66.
Zhong Guangfa, Guo Ningfen. Diagenetic lithofacies analysis: a whole new approach to studying diagenetic heterogeneity[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1997, 24(5): 62-66.
- [21] 王峰, 陈蓉, 田景春, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区长4+5油层组致密砂岩储层成岩作用及成岩相[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(2): 199-206.
Wang Feng, Chen Rong, Tian Jingchun, et al. Diagenesis and diagenetic facies of the Chang 4+5 tight sandstone reservoirs in Longdong area, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(2): 199-206.
- [22] 赖锦, 王贵文, 王书南, 等. 碎屑岩储层成岩相研究现状及进展[J]. *地球科学进展*, 2013, 28(1): 39-50.
Lai Jin, Wang Guiwen, Wang Shunan, et al. Research status and advances in the diagenetic facies of clastic reservoirs[J]. *Advances in Earth Science*, 2013, 28(1): 39-50.
- [23] 徐樟有, 魏萍, 熊琦华. 枣南油田孔店组成岩作用及孔隙演化模式[J]. *石油大学学报: 自然科学版*, 1995, 19(1): 7-12.
Xu Zhangyou, Wei Ping, Xiong Qihua. Diagenesis and pore evolution models of Kongdian member in Zaonan oilfield[J]. *Journal of the University of Petroleum, China*, 1995, 19(1): 7-12.
- [24] Ozkan A, Cumella S P, Milliken K L, et al. Prediction of lithofacies and reservoir quality using well logs, Late Cretaceous Williams Fork Formation, Mamm Creek field, Piceance Basin, Colorado[J]. *AAPG Bulletin*, 2011, 95(10): 1699-1723.
- [25] 王琪, 褚喜准, 陈国俊, 等. 鄂尔多斯西部长6砂岩成岩演化与优质储层[J]. *石油学报*, 2005, 26(5): 17-23.
Wang Qi, Zhuo Xizhun, Chen Guojun, et al. Diagenetic evolution and high-quality reservoir in Chang 6 sandstone in the western Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2005, 26(5): 17-23.
- [26] 陈振岩, 孟元林, 高建军, 等. 鸳鸯沟洼陷西斜坡成岩作用定量表征及有利区带预测[J]. *地学前缘*, 2008, 15(1): 71-79.
Chen Zhenyan, Meng Yuanlin, Gao Jianjun, et al. Quantitative characterization of diagenesis and prediction of favorable areas in the west slope of Yuanyanggou subsag[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(1): 71-79.
- [27] El-Ghali M A K, Mansurbeg H, Morad S, et al. Distribution of diagenetic alterations in glaciogenic sandstones within a depositional facies and sequence stratigraphic framework: evidence from the Upper Ordovician of the Murzuq Basin, SW Libya[J]. *Sedimentary Geology*, 2006, 190(1/4): 323-351.
- [28] 韩登林, 张昌民, 尹太举. 层序界面成岩反应规律及其对储层储集物性的影响[J]. *石油与天然气地质*, 2010, 31(4): 449-454.
Han Denglin, Zhang Changmin, Yin Taiju. Diagenetic reaction pattern of the sequence boundary and its impacts on reservoir quality[J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31(4): 449-454.
- [29] Guidry S A, Chafetz H S. Depositional facies and diagenetic alteration in a relict siliceous hot-spring accumulation: examples from Yellowstone national park, U. S. A. [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2003, 73(5): 806-823.
- [30] Machel H G, Burton E A. Burial-diagenetic sabkha-like gypsum and anhydrite nodules[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1991, 61(3): 394-405.
- [31] 郑荣才, 耿威, 周刚, 等. 鄂尔多斯盆地白豹地区长6砂岩成岩作用与成岩相研究[J]. *岩性油气藏*, 2007, 19(2): 1-8.

- Zheng Rongcai, Geng Wei, Zhou Gang, et al. Diagenesis and diagenetic facies of Chang 6 sandstone of Yanchang Formation in Baibao area, Ordos Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2007, 19(2): 1-8.
- [32] 窦伟坦, 田景春, 徐小蓉, 等. 陇东地区延长组长 6-8 油层组成岩相研究[J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2005, 32(2): 129-132. Dou Weitan, Tian Jingchun, Xu Xiaorong, et al. Diagenetic facies study on Chang 6-8 oil formations of Triassic Yanchang Formation in Ordos basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 2005, 32(2): 129-132.
- [33] 刘小洪, 罗静兰, 张三, 等. 榆林-神木地区上古生界盒 8 段及山 2 段气层的成岩作用和成岩相[J]. *石油与天然气地质*, 2006, 27(2): 200-208. Liu Xiaohong, Luo Jinglan, Zhang San, et al. Diagenesis and diagenetic facies of gas reservoirs in the Upper Paleozoic 8th member of Shihezi Fm and 2nd member of Shanxi Fm in Yulin-Shenmu area, Ordos basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2006, 27(2): 200-208.
- [34] 张响响, 邹才能, 朱如凯, 等. 川中地区上三叠统须家河组储层成岩相[J]. *石油学报*, 2011, 32(2): 257-264. Zhang Xiangxiang, Zou Caineng, Zhu Rukai, et al. Reservoir diagenetic facies of the Upper Triassic Xujiache Formation in the central Sichuan Basin[J]. *Acta Petroli Sinica*, 2011, 32(2): 257-264.
- [35] Zou Caineng, Tao Shizhen, Zhou Hui, et al. Genesis, classification, and evaluation method of diagenetic facies[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2008, 35(5): 526-540.
- [36] Railsback L B. Carbonate diagenetic facies in the Upper Pennsylvanian Dennis Formation in Iowa, Missouri, and Kansas [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1984, 54(3): 986-999.
- [37] 石玉江, 肖亮, 毛志强, 等. 低渗透砂岩储层成岩相测井识别方法及其地质意义——以鄂尔多斯盆地姬塬地区长 8 段储层为例[J]. *石油学报*, 2011, 32(5): 820-828. Shi Yujang, Xiao Liang, Mao Zhiqiang, et al. An identification method for diagenetic facies with well logs and its geological significance in low-permeability sandstones: a case study on Chang 8 reservoirs in the Jiyuan region, Ordos Basin[J]. *Acta Petroli Sinica*, 2011, 32(5): 820-828.
- [38] 黄荣樽. 地层破裂压力预测模式的探讨[J]. *华东石油学院学报*, 1984(4): 335-347. Huang Rongzun. A model for predicting formation fracture pressure[J]. *Journal of East China Petroleum Institute*, 1984(4): 335-347.
- [39] 李敏, 练章华, 陈世春, 等. 岩石力学参数试验与地层破裂压力预测研究[J]. *石油钻采工艺*, 2009, 31(5): 15-18. Li Min, Lian Zhanghua, Chen Shichun, et al. Rock mechanical parametric experiments and the research of formation fracture pressure prediction[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2009, 31(5): 15-18.
- [40] 宋杰. 砂岩油藏地应力及岩石力学参数与套管损坏相关性[J]. *地质力学学报*, 2014, 20(3): 324-330. Song Jie. The correlations between geological stress and casing damage and between rock mechanics parameters and casing damage in sandstone reservoir[J]. *Journal of Geomechanics*, 2014, 20(3): 324-330.
- [41] 高秋涛, 王界益, 戴诗华, 等. 基于岩石力学实验的测井评价井壁破坏压力方法与应用[C]//中国石油学会. 中国油气论坛 2010-石油测井专题研讨会论文集. 北京: 中国石油学会, 2010. Gao Qiutao, Wang Jieyi, Dai Shihua, et al. Based on rock mechanics experiments of logging evaluation method and application of casing damage stress[C]//Chinese Petroleum Society. China Oil and Gas Forum-A Special Forum on Petroleum Well Logging Technology. Beijing: Chinese Petroleum Society, 2010.
- [42] 曾庆坤. 宝浪油田异常破裂压力预测及降低破裂压力技术研究[D]. 成都: 西南石油学院, 2004. Zeng Qingkun. Technology about abnormal fracture pressure prediction and Reduce the fracture pressure in Baolang oil field [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2004.
- [43] 王丽忱. 页岩气藏岩石力学性质的测井评价方法与应用[D]. 北京: 中国地质大学, 2013. Wang Lichen. Research on logging evaluation and application of rock mechanics properties in shale gas reservoirs [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013.
- [44] 谢和平, 陈忠辉. 岩石力学[M]. 北京: 科学出版社, 2004. Xie Heping, Chen Zhonghui. Rock mechanics [M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [45] 路保平, 鲍洪志. 岩石力学参数求取方法进展[J]. *石油钻探技术*, 2005, 33(5): 44-47. Lu Baoping, Bao Hongzhi. Advances in calculation methods for rock mechanics parameters[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2005, 33(5): 44-47.
- [46] Handin J, Heard H C, Magouirk J N. Effects of the intermediate principal stress on the failure of limestone, dolomite, and glass at different temperatures and strain rates[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1967, 72(2): 611-640.
- [47] 杨海博, 武云云. 致密储层岩石的微观结构和力学性质试验分析[J]. *复杂油气藏*, 2011, 4(3): 10-15. Yang Haibo, Wu Yunyun. The experimental analysis of microstructure and mechanical properties of tight reservoir rocks[J]. *Complex Hydrocarbon Reservoirs*, 2011, 4(3): 10-15.
- [48] 李荣西, 段立志, 陈宝赞, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组砂岩钠长石化与热液成岩作用研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 2012, 31(2): 173-180. Li Rongxi, Duan Lizhi, Chen Baoyun, et al. Albitization and hydrothermal diagenesis of Yanchang oil sandstone reservoir, Ordos Basin[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2012, 31(2): 173-180.
- [49] 赵金洲, 任岚, 胡永全. 页岩储层压裂缝成网延伸的受控因素分析[J]. *西南石油大学学报: 自然科学版*, 2013, 35(1): 1-9. Zhao Jinzhou, Ren Lan, Hu Yongquan. Controlling factors of hydraulic fractures extending into network in shale formations[J]. *Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2013, 35(1): 1-9.
- [50] Rickman R, Mullen M J, Petre J E, et al. A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization: all shale plays are not clones of the Barnett shale[R]. SPE 115258, 2008. (收稿日期 2016-04-07 改回日期 2016-08-16 责任编辑 张怡)